

ポリイミド被覆 FBG センサの高温適用

福本伸太郎^{*1} 西土 隆幸^{*2} 吉川 和夫^{*3}
Fukumoto Shintaro Nishido Takayuki Yoshikawa Kazuo

ポリイミド被覆素線シングルモード光ファイバ (SMF) の FBG センサを用いて、400℃までの耐熱性評価を実施した。従来技術の問題点を踏まえ、光ファイバに限りなく近い径の管に、FBG センサを挿入し、FBG 部の片側のみを固定することで温度計測を行った。その結果、300℃以下において、FBG センサによる温度測定が可能なことを確認した。

キーワード：FBG センサ、温度計測、光ファイバセンサ、高温

1. はじめに

近年、光ファイバセンサの1つである FBG センサが、土木建築分野から航空宇宙分野まで幅広く利用されている。本稿では、FBG センサの高温領域における温度計測の可能性に着目した。中でも、ポリイミド被覆素線シングルモード光ファイバ (SMF) に着目した。

当社ではポリイミド被覆素線 SMF を利用している。一般の通信用光ファイバ素線の被覆材はアクリルであり、使用温度範囲の上限は 80℃である。また、ポリイミド被覆素線の使用温度範囲の上限は 300℃である⁽¹⁾。しかし当社では、ポリイミド被覆素線 SMF の耐熱性についてのデータを取得していないため、高温環境における FBG センサ適用の障害となっている。

本試験では、このような背景に基づき、400℃までのポリイミド被覆素線 SMF の耐熱性評価を行った。なお、本試験で使用した FBG センサは、市販されているものよりも簡便に作製でき、セン

サ径も小さいものである。

2. FBG センサの特長

まず、FBG センサの原理について説明する。**図 1** に FBG センサの構造図を示す。FBG とはファイバ・ブラッグ・グレーティング (Fiber Bragg Grating) の略称であり、本センサは電気抵抗式ひずみゲージと比較し、電気的影響を受けない、防爆性を有する、ひずみ感度が高い、1本の光ファイバで複数点の計測ができる、といった特長を持つ。FBG センサは、光ファイバのコア内にブラッグ格子と呼ばれる回折格子を形成し、特定の波長のみを反射する機能を持たせた光ファイバ型デバイスである。FBG によって反射した波長 λ_B は式 (1) で表せる。

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

ここで、 n_e は光ファイバの屈折率、 Λ は回折格子の周期である。式 (1) を満たす波長で強い反射が生じ、それ以外の波長は透過する。この反射した波長はブラッグ波長と呼ばれる。

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：研究開発センター センター長 工学博士 技術士 (建設部門) P. E. (Civil Eng.)
 名古屋大学大学院非常勤講師 芝浦工業大学大学院非常勤講師

*3：計測事業部 材料試験部

図2にASE光源（増幅自然光源）およびFBG透過光のスペクトルを、図3にFBG反射光スペクトルを示す。図2、図3より、透過光は1550 nm以外の波長スペクトルを、反射光は1550 nmのみの波長スペクトルを得ていることがわかる。

ブラッグ波長 λ_B は、ひずみ、および温度に応答して変化する。図4および図5に、FBGセンサのひずみと温度をそれぞれ独立に変化させたときの

ブラッグ波長変化を示す。それぞれ直線性を示しており、ひずみ、および温度の計測が可能となる。図4から求めたひずみ感度は $1.24 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ 、図5から求めた温度感度は約 $10 \times 10^{-3} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ である。各図における直線の傾きが感度を表す。これらの値は文献⁽²⁾で示されているものと同等の結果である。

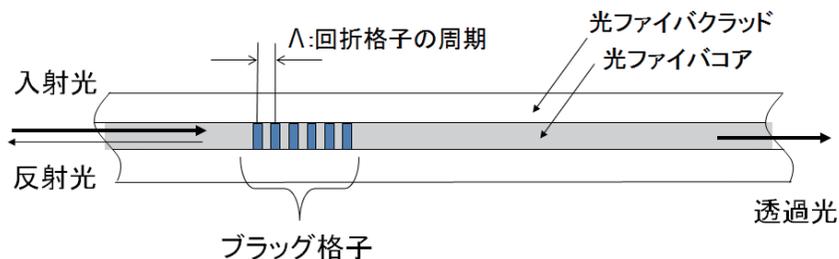


図1 FBG センサの構造図

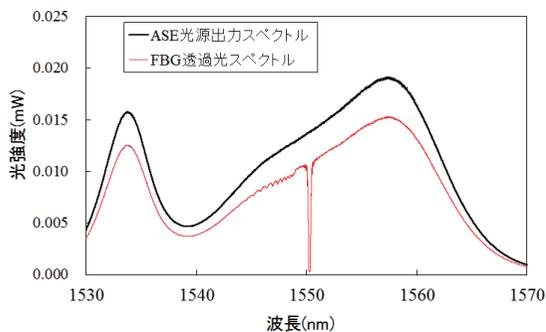


図2 ASE光源およびFBG透過光のスペクトル

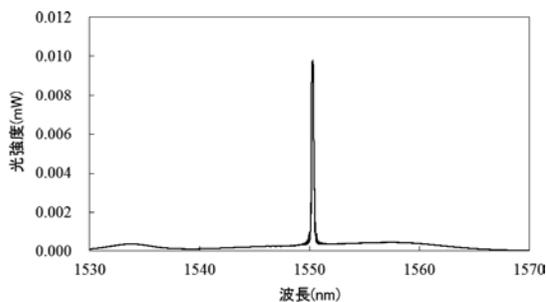


図3 FBG 反射光のスペクトル

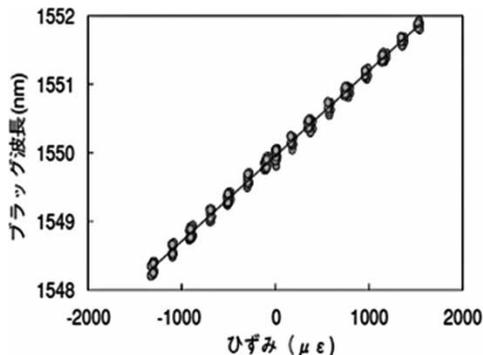


図4 ひずみとブラッグ波長の関係

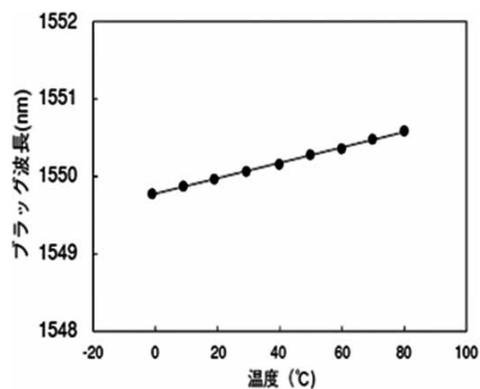


図5 温度とブラッグ波長の関係

3. 従来技術の問題点

3.1 市販されている光式温度センサ

現在、市販されている光式温度センサ（os4210、MICRON OPTICS 社）は、FBG 部のハウジング材を含め、小型なものでも $\phi 1.07$ mm である。これでは光ファイバの径が小さい（SMF 外径 0.15 mm）という利点を活かしきれていない。

3.2 光学温度センサ⁽³⁾

この発明は、温度の変化を伸び縮みの変化に変換する感温部材に、張力をかけた状態で FBG センサを接着し、測定をするというものである。しかし、FBG センサを感温部材に固定しなければひずみの計測ができないため、感温部材が必要であり、測定する箇所が限定されてしまう。また、センサ自体の寸法も大きくなってしまう。

3.3 FBG センサ温度計測装置と FBG センサ組み込み発電機⁽⁴⁾

この発明は、FBG センサに張力がかからないようにして被測定物に貼り付けた状態で温度を測定するものであるが、張力がかからないように貼り付けする手法が具体的に明記されていない。

4. 試験内容

前述した従来の FBG センサによる温度測定技術の問題点を解決するために、独自の方法による試験を実施し、測定精度を確認した。

4.1 試験概要

SUS 細管内に FBG センサを挿入した温度センサ (FBG 温度センサ)、および熱電対を SUS プレートに貼り付け、400℃ までの温度計測を実施した。FBG 温度センサにより、各温度のブラッグ波長、および反射率の変化を計測した。ここで反射率とは、入射光と反射光の光強度比である。

4.2 FBG 温度センサ

図 6 に、本試験で作製した FBG 温度センサを示す。図 6 のように、光ファイバに限りなく近い径の管に FBG センサを挿入した。FBG 部の片側のみを固定し、もう一方の軸方向・径方向を自由境界とした。この方法により、FBG 部と管との間に摩擦の影響がない状態で測定することができ、管および被測定物のひずみ変化を無視し、温度に限定した測定ができる。

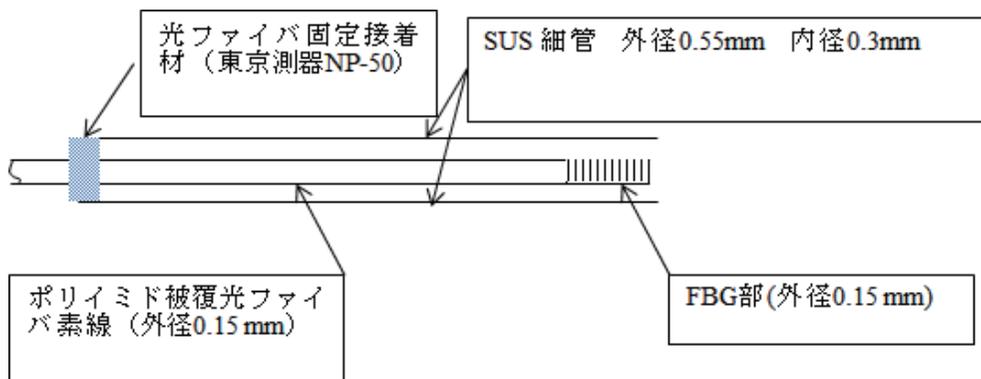


図 6 FBG 温度センサの構造

4.3 温度計測試験方法

図7に試験方法を、図8に試験装置の設置状況を、そして図9に試験片の設置状況を示す。SUSプレート（長さ50mm、幅50mm、厚さ4mm）にFBG温度センサ、および熱電対をスポット溶接した。

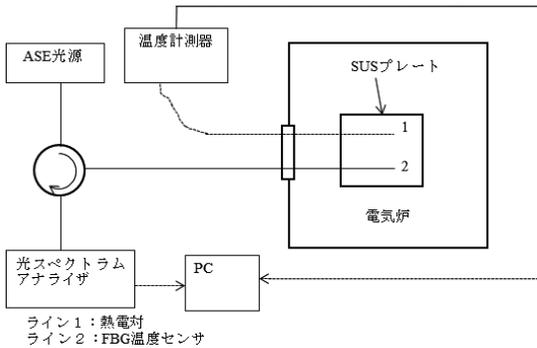


図7 試験方法



図8 試験装置の設置状況

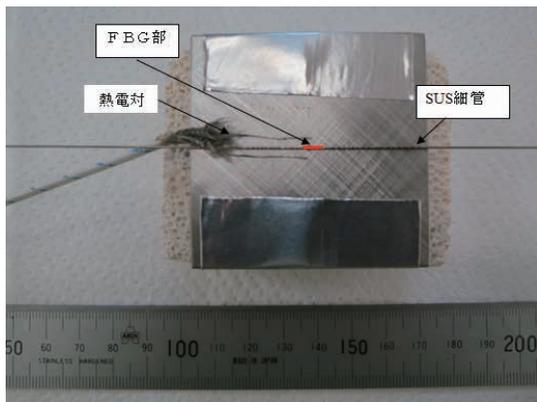


図9 試験片の設置状況

5. 試験結果と考察

5.1 温度ステップ

試験片に溶接した熱電対の温度ステップを図10に示す。なお、試験開始温度は20.3℃であった。

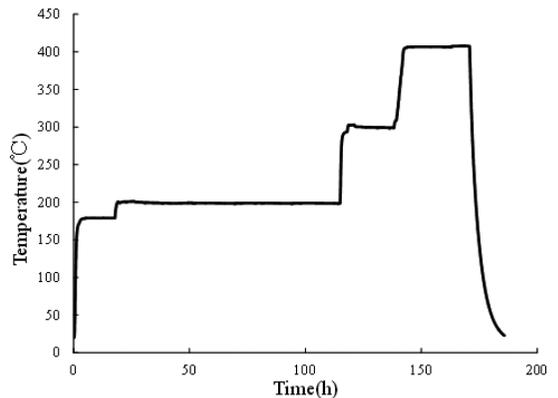


図10 試験中の温度ステップ

5.2 試験片の外観目視とポリイミド被覆の劣化状況

図11に、自然冷却後の試験片の外観を示す。図11より、外観は特に変化は見られなかったが、SUS管内のFBGセンサを取り出してみたところ、FBG部付近のポリイミドは黒くなっていた。これはポリイミドが高温により劣化したと考えられる。

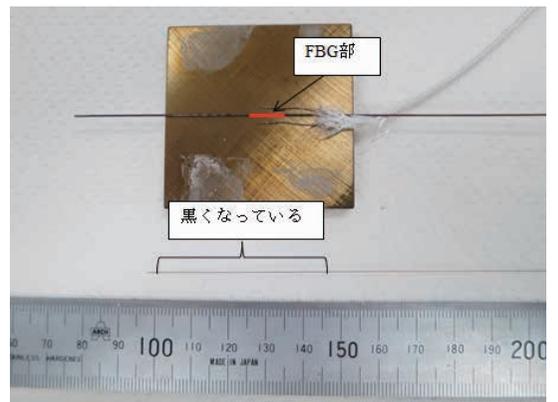


図11 自然冷却後の試験片

5.3 ブラッグ波長変化

図 12 に、試験開始から終了までにおける、時間に対するブラッグ波長変化を示す。図 12 より、FBG センサでは温度上昇とともにブラッグ波長も変化しているが、温度を保持したときには、波長の変化はなかった。

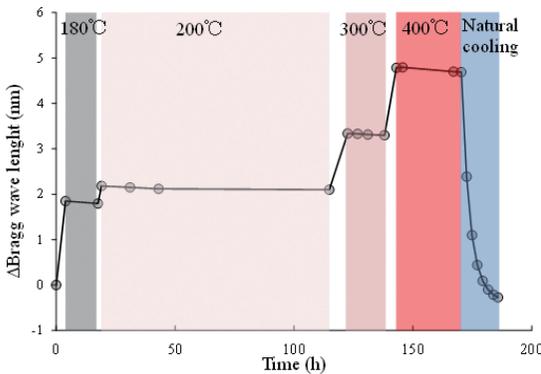


図 12 時間に対するブラッグ波長変化

5.4 温度変化における可逆性

図 13 に、温度変化とブラッグ波長変化の関係を示す。図 13 より、FBG 温度センサは、室温から 400°C まで温度を上げたときの波長変化 (Heating) と、室温に戻したときの波長変化 (Natural Cooling) に可逆性が見られた。また、FBG 温度センサは一般的な FBG センサの温度感度 (約 $10 \times 10^{-3} \text{ nm/}^\circ\text{C}$)

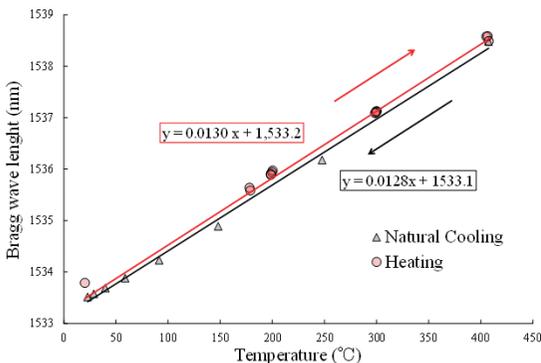


図 13 温度変化と FBG 温度センサのブラッグ波長の変化

と近い感度を得た (加熱時 $13.0 \times 10^{-3} \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、自然冷却時 $12.8 \times 10^{-3} \text{ nm/}^\circ\text{C}$)。

5.5 反射率の変化

図 14 に、経過時間における FBG 温度センサの反射率の変化を示す。反射率は左縦軸であり、ブラッグ波長は右縦軸である。図 14 より、FBG 温度センサは温度上昇に伴い反射率が低下している。300°C より高温において、反射率は 0.5 以下となった。また、自然冷却時は反射率の低下があまりなかったが、試験開始前の反射率には戻らなかった。

反射率 (入射光と反射光の光強度比) の低下によって、ブラッグ波長の光強度が低下する。一般的に、この現象は長距離の配線、接続コネクタの使用、ケーブルやセンサの曲げなどによって起きる。多少の反射率の低下は測定精度に影響はしない。しかし、大幅な反射率の低下によって、ブラッグ波長とノイズとの光強度の差が小さくなり、測定自体が不能となってしまふ。本試験のように研究室レベルの簡潔な試験状況では、反射率が 0.5 以下となっても温度測定ができていたが、現場を想定すると、反射率が 0.5 以上あることが望ましいと考える。

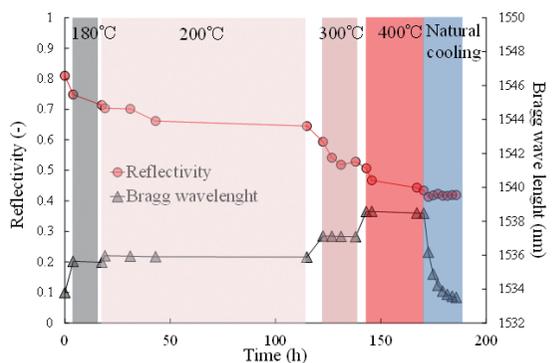


図 14 経過時間における FBG 温度センサの反射率の変化

6. まとめ

本試験の結果を以下にまとめた。

- ① SUS 管内に挿入した FBG センサは、400℃までの温度上昇とともにブラッグ波長も変化するが、温度を保持したときは、波長の変化はなかった。なお、自然冷却に伴い、ブラッグ波長は初期値まで戻った。
- ② FBG 温度センサは一般的な FBG センサの温度感度と近い値を得た。
- ③ FBG 温度センサは温度上昇に伴い反射率が低下した。300℃より高温において、反射率は 0.5 以下となった。

本試験では、反射率が 0.5 以下となった 400℃においても温度測定ができていることが確認できたが、反射率の不可逆性、および試験後のポリイミド被覆の劣化状況から、300℃より高温の計測が困難であると考えた。よって、SUS 細管内に FBG センサを挿入した FBG 温度センサは、300℃以下の温度測定が可能であるとした。

参考文献

- (1) 株式会社ロゴスホームページ : http://www.logosgp.com/fbg_sensor.html
- (2) Othonos A. and Kalli K. : Fiber Bragg Grating, Artech House Publishers, pp.98-99, 1999
- (3) 出雲正樹 : 特開 2003-254838、光学温度センサー、特許庁
- (4) 池田悠紀 : 特開 2014-206422、FBG センサを用いた温度計測方法及びその装置並びに FBG センサを組込んだ発電機、特許庁



研究開発センター
研究開発グループ

福本伸太郎

TEL. 045-791-3522

FAX. 045-791-3547



研究開発センター センター長
工学博士 技術士 (建設部門)
P. E. (Civil Eng.)

名古屋大学大学院非常勤講師
芝浦工業大学大学院非常勤講師

西土 隆幸

TEL. 045-791-3522

FAX. 045-791-3547



計測技術部
材料試験部

吉川 和夫

TEL. 045-791-3519

FAX. 045-791-3542